شبیه‌سازی اکستروژن لوله فولاد زنگ‌نزن آستنیتی AISI 304 و مقایسه نتایج با روابط کران بالا*

محمدرضا بهمنی[۱]	خسرو فرمنش[۲]	غلامحسین برهانی[۳]

چکیده

هدف پژوهش، بررسی اثر دمای اولیه شمش، سرعت اکستروژن، نسبت اکستروژن و زاویه قالب روی فرایند اکستروژن لوله فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴، به‌ویژه نیروی اکستروژن و رسیدن به پارامترهای بهینه برای انجام فرایند بود. برای شبیه‌سازی نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. دوازده نمونه باشرایط اولیه مختلف بررسی شد. باتوجه به تقارن محوری فرایند، برای شبیه‌سازی مدل متقارن محوری دوبعدی استفاده شد. همچنین برای حل فرایند، حل جفت‌شده مکانیکی-حرارتی استفاده شد. برای رسیدن به درجه‌های آزادی موردنیاز، از المان CAX4RT استفاده شد. دمای اولیه شدیدترین اثر را روی نیروی اکستروژن دارد. نتایج شبیه‌سازی با نتایج تحلیل ریاضی انطباق خوبی را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: اکستروژن لوله، فولاد زنگ‌نزن AISI 304، شبیه‌سازی، روش تحلیلی حد بالایی

Numerical Simulation of Tube Extrusion Process of AISI304 and Comparing with Upper Bound Solutions

M.R. Bahmani	K. Farmanesh	G. Borhani

Abstract
The study purpose was to evaluate the effect of initial billet temperature, extrusion speed, extrusion ratio and angle on the tube extrusion process of AISI304, particularly the extrusion force, and achieve optimal parameters. Abaqus software was used for the simulation purpose. 12 samples were evaluated with different initial conditions. Two-dimensional axisymmetric model was used to simulate the process, due to the axial symmetry of the process. Mechanical-thermal coupled solution was used for process solution. Also, CAX4RT elements were used for achieving all the degrees of freedom. The initial temperature was found to have the strongest effect on the force.

Key Words Tube Extrusion; AISI 304 Stainless steel; Simulation; Upper Bound Method.

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ۹۴/۶/۶ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ ۹۵/۵/۵ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد – شکل‌دهی فلزات، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران.

(۲) نویسنده مسئول: استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران.

Email: kfarmanesh@gmail.com

(۳) استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران.

DOI: 10.22067/ma.v0i29.48714

مقدمه

اکستروژن یکی از فرایندهای معمول شکل‌دهی حجیم برای تغییرشکل مواد به محصولات نیمه‌تمام است [1]. یکی از محصولاتی که با این روش تولید می‌شود، لوله‌های بدون درز است. لوله بدون‌درز فولاد زنگ‌نزن AISI 304، قطعه مهمی است که در صنعت نفت، صنعت حمل و نقل و صنایع دفاع کاربرد وسیعی دارد، که به‌طورعمده به‌علت مقاومت به خوردگی و اکسید شدن عالی آن و کارایی خوب آن تحت دماهای بالا و پایین است[2].

لوله‌های بدون‌درز فولاد زنگ‌نزن، می‌تواند توسط روش اکستروژن با استفاده از شیشه به‌عنوان روانکار، تولید شود. فرایند در دمای بالا انجام شده و با تغییرشکل‌های بزرگ و نرخ‌کرنش‌های بالا مرتبط است.

به‌طور معمول، تحلیل فرایند شکل‌دهی فلزات، بااستفاده از شیوه‌های تحلیلی، عددی، یا فیزیکی انجام می‌شود [3]. به‌علت پیچیدگی رابطه‌های درگیر در شیوه تحلیلی، چنین روش‌هایی تنها برای حالت هندسی و شرایط مرزی ساده کاربرد دارد[3]. طراحی، کنترل و بهینه‌سازی فرایند شکل‌دهی، به دانش تحلیلی در زمینه سیلان فلز، تنش‌ها و انتقال حرارت و همچنین اطلاعات فنی مربوط به روانکاری، تکنیک‌های گرم کردن و سرد کردن، جابجایی مواد، طراحی قالب و تولید و تجهیزات شکل‌دهی نیاز دارد[4].

هدف اصلی استفاده از تحلیل در شکل‌دهی فلزات، تحقیق در مورد مکانیک فرایندهای تغییرشکل پلاستیک با اهداف عمده زیر می‌باشد.

- تعیین روابط حرکتی (شکل، سرعت‌ها، نرخ کرنش و کرنش) بین شمش خام یا قطعه نیمه تمام و محصول نهایی، برای مثال پیش‌بینی سیلان فلز درحین عملیات شکل‌دهی می‌باشد؛
- تعیین حدود شکل‌پذیری یا قابلیت تولید؛

پیش‌بینی تنش‌ها، نیروها، و انرژی لازم برای انجام عملیات شکل‌دهی[4].

بهینه‌سازی فرایند اکستروژن صنعتی اغلب روی روش تجربی استوار شده که نتیجه آن محدودیت در بهره‌وری می‌باشد. از طرفی باتوجه به اینکه پیش‌بینی‌های سریع توسط شبیه‌سازی‌های کامپیوتری انجام می‌شود که در بهبود قابلیت رفتار یکپارچه بار اعمالی و تجهیزات داخلی فرایند مؤثر است[5]، می‌توان با شبیه‌سازی فرایند اکستروژن به شرایط بهینه‌ای برای انجام عملی این فرایند رسید.

شبیه‌سازی اجزای محدود ابزاری مهم در طراحی و توسعه اکستروژن و فرایندهای دیگر تولیدی می‌باشد. بیشترین کارهای شبیه‌سازی در مورد اکستروژن آلومینیم است ولی کارهایی نیز در زمینه اکستروژن فولاد و تیتانیم انجام شده[6] است که ازآن‌جمله می‌توان به کارهای داموداران و شیوپوری[7]، لی و همکاران[8] روی تیتانیم و کارهای هانسون[9]، اپلر و میسولک[10]، سیواپراساد و همکاران[11]، جانسون و هانسون[6]، سزارکوفسکی و همکاران[12] و هانسون و دامکین[13] روی فولاد اشاره کرد.

شبیه‌سازی اکستروژن با استفاده از روش اجزای محدود، درطول دهه گذشته عادی‌تر شده است. معمول‌ترین روش در این نوع شبیه‌سازی، استفاده از دمای شمش یکنواخت به‌عنوان شرایط اولیه در مدل اکستروژن است. حالت اولیه گرم‌کردن و حمل و نقل، اغلب نادیده گرفته می‌شود[14]. هرچند روش اجزای محدود می‌تواند مبنای درستی برای مطالعه و بهینه‌کردن تغییرشکل اتفاق افتاده در فرایند اکستروژن پیچیده فراهم کند، نمی‌تواند ابزار را طراحی کند[15].

اهمیت مدل‌سازی و شبیه‌سازی در صنعت شکل‌دهی فلزات به‌سختی در طول دهه‌های گذشته افزایش یافته است[16]. استفاده از روش المان محدود برای شبیه سازی فرایندهای شکل‌دهی فلزات در اواخر دهه ۱۹۶۰ آغاز شد. ازجمله اولین کسانی که برای حل مسأله خود از این روش استفاده کردند باید به مارشال و کینگ در سال ۱۹۶۷ و لی و کوباباشی در سال ۱۹۷۰ اشاره کرد که

با مسائل الاستیک–پلاستیک سروکار داشتند[17].

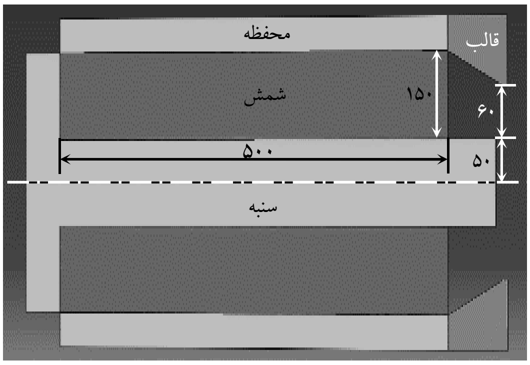
شبیه‌سازی فرایند با استفاده از روش المان محدود در حال حاضر به عنوان یک ابزار مهم برای توسعه محصول و فرایند پذیرفته شده است. با این حال، معرفی شبیه-سازی کامپیوتری در تکنولوژی اکستروژن به سرعت دیگر بخش های صنعت تولید نبوده است. این موضوع دراصل به‌دلیل تغییرشکل‌های بسیار بزرگی است که این شبیه‌سازی را از لحاظ فنی به چالش کشیده و کامپیوتر طلب کرده است. شبیه‌سازی فرایندهای اکستروژن گرم به وضوح یکی از مشکل‌ترین مسائل در مدل‌سازی فرایند است[16].

با این حال، پتانسیل استفاده از روش‌های عددی برای تجزیه و تحلیل اکستروژن بالا می‌باشد. اهمیت فرایند کلی، از جمله حالت ناپایدار اولیه اکستروژن، می‌تواند تجزیه و تحلیل شود[18]. برای مثال تکامل تنش، نرخ کرنش و دما در مواد در طول فرایند را می توان در جزئیات مورد مطالعه قرار داد. چون ظرفیت سخت‌افزاری و نرم‌افزاری رایانه در حال افزایش است، بدون شک روش اجزای محدود یک ابزار پرکاربرد برای توسعه و بهینه‌سازی اکستروژن است.

در این کار براساس مطالعاتی که روی کارهای قبلی انجام گرفت، سعی بر این است که شرایط بهینه‌ای از فرایند اکستروژن برای تولید لوله‌های فولاد زنگ‌نزن بدست آید. این شرایط شامل دمای اولیه شمش، نسبت اکستروژن، سرعت اکستروژن و زاویه قالب برای به-حداقل رساندن نیروی موردنیاز برای فرایند می‌باشد. از دیگر اهداف این تحقیق بدست آوردن منحنی‌های تنش–کرنش و نرخ‌کرنش در منطقه تغییرشکل و در شرایط اولیه مختلف، و مقایسه آن با نتایج حاصل از روابط تحلیلی، و همچنین رسیدن به شرایط و پارامترهای بهینه برای دست‌یابی به کمترین نیروی اکستروژن در انجام فرایند می‌باشد. افزایش دمای سطح خروجی نیز درحین فرایند مورد بررسی قرار گرفته و با نتایج حاصل از روابط تحلیلی مقایسه می‌شود.

شرح فرایند اجزای محدود

هندسه مدل و شرایط اولیه آن. باتوجه به هندسه متقارن محوری فرایند اکستروژن، مدل اجزای محدود دوبعدی متقارن محوری استفاده شد. شکل (۱) مدل اولیه را پس از چیدمان اجزا درکنار هم نشان می‌دهد. همانطور که در شکل(۱) نشان داده شده، سنبه متحرک و متصل به فک مدل شده است. ابعاد مدل اولیه برای اکستروژن لوله فولاد زنگ‌نزن AISI 304 در جدول (۱) آمده است. سایر پارامترهای اولیه مدل اکستروژن در جدول (۲) آمده است.



شکل ۱ موقعیت قرارگیری اجزای فرایند در کنار هم

جدول ۱ پارامترهای ابعادی مدل اولیه (میلی‌متر)

طول شمش	قطر خارجی شمش	قطر داخلی شمش و لوله	ضخامت لوله	ضخامت محفظه	زاویه قالب
۵۰۰	۳۰۰	۱۰۰	٦۰	٤۰	۳۰

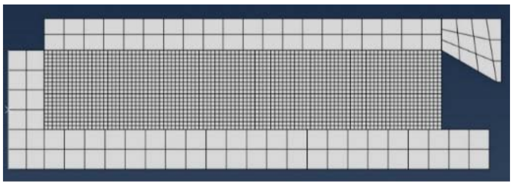
شمش اولیه در مدل‌سازی به‌صورت پیش‌سوراخ‌شده درنظر گرفته شد. همچنین از خواص فولاد زنگ‌نزن AISI 304 کارشده برای شمش اولیه و خواص فولاد مقاوم به حرارت AISI H13 برای مدل‌سازی تجهیزات فرایند استفاده شد.

جدول ۲ پارامترهای اولیه مدل اکستروژن

پارامتر	محدوده
سرعت فک	(mm/s) ۲۵۰–۱۰۰
دمای اولیه شمش	(K) ۱٤۷۳–۱۲۷۳
دمای اولیه سنبه، فک، قالب، محفظه	(K) ۵۷۳
ضریب اصطکاک شمش–قالب، شمش–محفظه	۰/۰۳
ضریب اصطکاک شمش–سنبه، شمش–فک	۰/٤
ضریب انتقال حرارت بین شمش–قالب، شمش–محفظه	$(W/m^2/K)$ ۱۵۰۰
ضریب انتقال حرارت بین شمش–سنبه، شمش–فک	$(W/m^2/K)$ ۲۵۰۰
زاویه قالب	۳۰–۹۰ درجه
قطر خارجی لوله	(mm) ۲٤۰–۱۸۰

گام تحلیل و طراحی مش. با توجه به شرایط تعیین شده تحقیق و شرایط فرایند که در آن، تحلیل تنش در طول فرایند وابسته به توزیع دما و همچنین توزیع دما وابسته به حل تنش بود، در این تحقیق از تحلیل جابجایی–حرارتی کاملا جفت شده (Dynamic, Temp-disp, Explicit) استفاده شد که در آن حل‌های مکانیکی و حرارتی به‌صورت همزمان استخراج می‌شود.

برای مش‌بندی نمونه، پس از بررسی المان‌های گوناگون با درجات آزادی مختلف و با توجه به شرایط مدل که یک مدل دوبعدی متقارن استفاده شده و نوع تحلیل که از تحلیل جابجایی–حرارتی کاملا جفت شده استفاده شده، برای دستیابی به درجات آزادی موردنیاز تحلیل، از المان CAX4RT روی نمونه استفاده شد. این المان یک المان چهارگوش متقارن محوری جفت‌شده حرارتی–مکانیکی با چهار گره بوده که همزمان به جابجایی و دما وابسته است. مش‌بندی مدل با این المان و با استفاده از روش مش‌بندی لاگرانژی- اویلری اختیاری انجام شد. شکل(۲) مدل مش‌بندی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۲ مدل مش‌بندی شده با استفاده از المان CAX4RT

شرایط مدل. در این تحقیق اثر پارامترهای اولیه روی فرایند با تغییر آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. جدول(۳) مدل‌های بررسی شده و شرایط آن‌ها را نشان می‌دهد. همچنین مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس ٦ و با استفاده از روش حل صریح، حل شد.

جدول ۳ مدل‌های بررسی شده در پژوهش و شرایط آنها

نمونه	دمای اولیه شمش (کلوین)	سرعت فک (میلی‌متر بر ثانیه)	قطر روزنه قالب (میلی‌متر)	زاویه قالب	نسبت اکستروژن
T1273	۱۲۷۳	۲۰۰	۲۲۰	۳۰	۲/۱
T1373	۱۳۷۳				
T1473, V200, ER2.1, A30	۱٤۷۳				
V100	۱٤۷۳	۱۰۰	۲۲۰	۳۰	۲/۱
V150		۱۵۰			
V250		۲۵۰			
ER1.7	۱٤۷۳	۲۰۰	۲٤۰	۳۰	۱/۷
ER2.7			۲۰۰		۲/۷
ER3.6			۱۸۰		۳/٦
A45	۱٤۷۳	۲۰۰	۲۲۰	٤۵	۲/۱
A60				٦۰	
A90				۹۰	

شرح حل تحلیلی

برای حل تحلیلی فرایند از روش تحلیل کران بالایی استفاده شد. در این، حل‌ها با کمینه‌ساختن توان کل فرمول‌سازی شده، پیدا می‌شوند که این کار با انتخاب

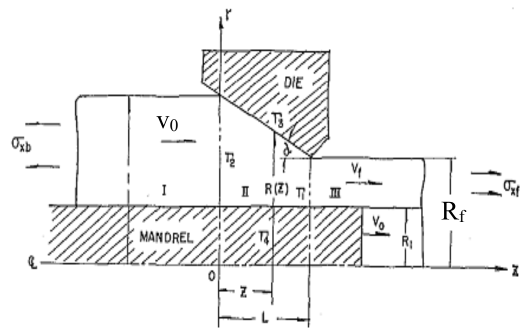
میدان سرعت جنبشی قابل قبول انجام می‌شود[19] . منطقه تغییرشکل با سطح یک قالب، سطح یک سنبه استوانه‌ای و دو سطح عمودی در ورودی قالب (یا شروع منطقه مرده) و خروجی قالب محدود شده است. این منطقه در شکل(۳) نشان داده شده است. در این منطقه میدان سرعت در سیستم مختصات استوانه‌ای به‌صورت زیر می‌باشد[20]:

$$U_r = v_0 \frac{R(z).R'(z).(R_0^2-R_i^2).(r^2-R_i^2)}{r(R^2(z)-R_i^2)^2}$$

$$U_z = v_0 \frac{(R_0^2-R_i^2)}{(R^2(z)-R_i^2)}$$

$$U_\theta = 0 \qquad (۱)$$

که در آن $R(z) = R_0 - z\tan\alpha$ می‌باشد.



شکل ۳ شماتیک فرایند اکستروژن لوله و پارامترهای مربوط به منطقه تغییرشکل آن [۲۰].

تغییرشکل تنها در این منطقه اتفاق می‌افتد. در سیستم مختصات استوانه‌ای، نرخ‌کرنش با مشتق‌گیری از میدان‌های سرعت، از رابطه‌های زیر بدست می‌آید [۲۰]:

$$\dot{\varepsilon}_{rr} = \frac{v_0 R(z).R'(z).(R_0^2-R_i^2).(r^2+R_i^2)}{(R^2(z)-R_i^2)^2.r^2} \qquad (۲)$$

$$\dot{\varepsilon}_{\theta\theta} = \frac{v_0 R(z).R'(z).(R_0^2-R_i^2).(r^2-R_i^2)}{(R^2(z)-R_i^2)^2.r^2} \qquad (۳)$$

$$\dot{\varepsilon}_{zz} = \frac{-2v_0 R(z).R'(z).(R_0^2-R_i^2)}{(R^2(z)-R_i^2)^2} \qquad (٤)$$

$$\dot{\varepsilon}_{r\theta} = \dot{\varepsilon}_{\theta z} = 0 \qquad (٥)$$

$$\dot{\varepsilon}_{rz} = \frac{v_0(R_0^2-R_i^2).(r^2-R_i^2)\{-R'^2(z)(3R^2(z)+R_i^2)\}}{2r.(R^2(z)-R_i^2)^3} \qquad (٦)$$

همچنین نرخ‌کرنش متوسط درطول فرایند اکستروژن از رابطه پیشنهادی فلثام محاسبه می‌شود[21] :

$$\bar{\dot{\varepsilon}} = \frac{6D_0^2 V_0 \ln ER}{D_0^3 - D_f^3} \qquad (۷)$$

اما برای محاسبه نیروی اکستروژن باید توان تغییرشکل ماده در فرایند اکستروژن را محاسبه کرد. توان بیرونی برای تغییرشکل ماده در فرایند اکستروژن لوله توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود[22]:

$$J^* = \pi(R_0^2 - R_i^2)V_0 P_{ext} \qquad (۸)$$

با بدســـت آوردن توان هر یک از ســـطوح در منطقه تغییرشکل و محاسبه توان کل، توان کل محاسبه شده را با رابطه (۸) معادل‌ســـازی کرده که نتیجه آن بدســـت آوردن فشار اکستروژن از رابطه زیر می‌باشد[22]:

$$\frac{P_{ext}}{\sigma_0} = \frac{4(R_0-R_f)R_i}{(R_0-R_i)(R_f+R_i)} + \frac{2(R_f-R_i)}{(R_f+R_i)}\ln\left(\frac{R_0-R_i}{R_f-R_i}\right)f(\alpha)$$
$$+ \frac{2}{\sqrt{3}(R_f+R_i)}\left(\frac{2\sin\alpha-\cos\alpha\sin\alpha-\alpha}{2\sin^2\alpha}R_i + \frac{\alpha-\cos\alpha\sin\alpha}{2\sin^2\alpha}R_f\right)$$
$$+ \frac{2}{\sqrt{3}(R_0+R_i)}\left(\frac{2\sin\alpha-\cos\alpha\sin\alpha-\alpha}{2\sin^2\alpha}R_i + \frac{\alpha-\cos\alpha\sin\alpha}{2\sin^2\alpha}R_0\right)$$
$$+ \frac{2m_d R_f}{\sqrt{3}(R_f+R_i)}(\cot\alpha)\ln\left(\frac{R_0-R_i}{R_f-R_i}\right) + \frac{2m_m}{\sqrt{3}\sin\alpha}\left(\frac{R_i}{R_f-R_i}\ln\left(\frac{R_0-R_i}{R_f-R_i}\right) - \frac{R_i(R_0-R_f)}{R_0^2-R_i^2}\right)$$
$$+ \frac{2m_d R_f}{\sqrt{3}(R_f^2-R_i^2)}L_f + \frac{2m_m R_i(R_0^2-R_f^2)}{\sqrt{3}(R_f^2-R_i^2)(R_0^2-R_i^2)}L_f$$
$$+ \frac{2m_c}{\sqrt{3}}\left(L_0 - \frac{R_0-R_f}{\sin\alpha}\right)\frac{R_0}{R_0^2-R_i^2} \qquad (۹)$$

در این رابطه تابع $f(\alpha)$ باســـتفاده از رابطه زیر محاســـبه می‌شود [۲۲]:

$$f(\alpha) = \frac{1}{\sin^2\alpha}\left(1 - \cos\alpha\sqrt{1-\frac{11}{12}\sin^2\alpha} + \frac{1}{\sqrt{\frac{11}{12}}}\ln\left(\frac{1+\sqrt{\frac{11}{12}}}{\sqrt{\frac{11}{12}}\cos\alpha + \sqrt{1-\left(\frac{11}{12}\right)\sin^2\alpha}}\right)\right) \qquad (۱۰)$$

همچنین σ_0 که برابر با تنش میانگین است، از رابطه زیر بدست می‌آید[23]:

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{1}{lnER}\int_0^{lnER} \sigma d\varepsilon \qquad (١١)$$

در فرایند اکســـتروژن داغ باتوجه به بالا بودن دما، تنش سیلان به تغییرات دما وابسته بوده و همچنین نرخ کرنش نیز در مقدار آن مؤثر اســت. جانســون و کوک رابطه‌ای را برای تنش سیلان ارائه داده‌اند که وابستگی آن به کرنش، نرخ‌کرنش و دما را درنظر گرفته‌اند. این رابطه به‌صورت زیر می‌باشد[24]:

$$\sigma(T, \varepsilon, \dot{\varepsilon}) = (A + B\varepsilon^n)\left[1 + C\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right]\left[1 - \left(\frac{T-T_r}{T_m-T_r}\right)^m\right] \qquad (١٢)$$

پارامترهای این رابطه برای فولاد زنگ‌نزن ٣٠٤ در جدول (٤) آمده است.

جدول ٤ مقدار پارامترهای رابطه جانسون-کوک برای فولاد زنگ-نزن ٣٠٤ [٢٤]

پارامتر جانسون-کوک	A	B	C	n	m	T_r (K)	T_m (K)	$\dot{\varepsilon}_0$ (s^{-1})
مقدار	٢٩٠/٨	٦٤١/٥	٠/٤٠	٠/٥١	٠/٥٤	٢٩٨	١٧٢٧	١

برای اینکه بتوان از رابطه استفاده کرد، نیاز به محاسبه نرخ کرنش فرایند است. نرخ کرنش متوسط درطول اکستروژن با استفاده از رابطه (٧) محاسبه می‌شود.

اما در شکل‌دهی حرارتی، دمای قطعه به‌دلیل تغییرشکل حرارتی افزایش می‌یابد که این افزایش دما بااستفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود[25]:

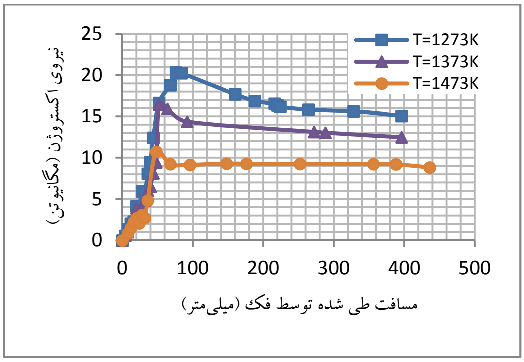
$$\Delta T_d = \frac{\eta \int \sigma d\varepsilon}{\rho C_p} \qquad (١٣)$$

همچنین در اثر اصطکاک بین شمش و قالب، مقداری حرارت تولید می‌شود که از آن در محاسبات صرفنظر شد.

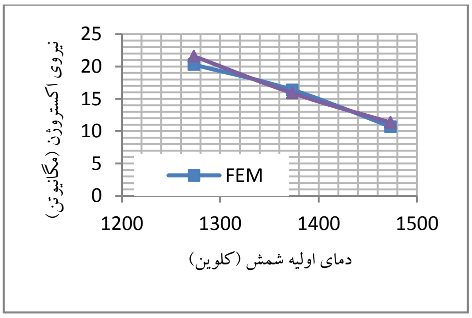
نتایج و بحث

اثر پارامترهای اولیه روی نیروی اکستروژن. شکل(٤) منحنی نیروی اکســتروژن برحســب مســافت فک را در دمای اولیه شــمش مختلف نشــان می‌دهد. همان‌طور که مشــاهده می‌شــود، در ابتدای فرایند، نیروی اکســتروژن به‌ســرعت افزایش یافته تا به مقدار بیشــینه خود برسـد. پس از رسیدن نیروی اکستروژن به مقدار بیشینه مورد نیاز فرایند، روند کاهشی آن شکل می‌گیرد. در واقع در ابتدا به‌دلیل وجود اصطکاک در فصل مشترک شمش و تجهیزات، نیروی اکســتروژن به مقدار بیشــینه خود می‌رسد و سپس به حالت پایدار می‌رسد[25]. این روند در کارهای[26,12,11] نیز مشاهده شده است.

طبق آنچه قبلا گفته شــد، با افزایش دمای اولیه شمش، نیروی اکستروژن کاهش می‌یابد [27] که شکل ٥ این کاهش را به‌وضــوح نشــان می‌دهد. این در حالی اســت با افزایش ٢٠٠ درجه‌ای دما از ١٢٧٣ کلوین به ١٤٧٣ کلوین، نیروی اکســتروژن از حدود ٢٠ مگانیوتن به ١٠ مگانیوتن کاهش پیدا کرده اســت که نشــان‌دهنده کاهش شدید در نیروی اکستروژن می‌باشد. در واقع با افزایش ٢٠٠ درجــه‌ای دمــای اولیــه شـــمش، نیروی اکستروژن به نصف رسیده است. علت این موضوع به اثر دما روی تنش ســیلان مربوط می‌باشـد. در واقع با افزایش دمای شمش، تنش سیلان ماده کاهش یافته و لذا مقاومت ماده دربرابر تغییرشــکل کاهش می‌یابد که این امر باعث کاهش نیروی اکستروژن می‌شود.



شکل ٤ منحنی نیروی اکستروژن برحسب مسافت طی‌شده توسط فک در دمای اولیه شمش مختلف.



شکل ٥ بیشینه نیروی اکستروژن اجزای محدود و محاسبه شده برحسب دمای اولیه شمش

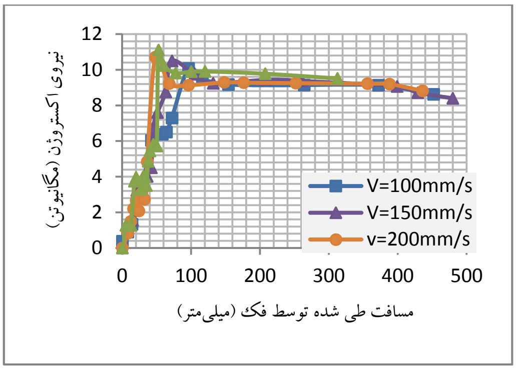
برای بررسی صحت نتایج، نیروی اکستروژن با استفاده از رابطه (۹) محاسبه شد و با نتایج بدست آمده از مدل مقایسه گردید که حاصل این مقایسه در شکل (۵) آمده است. این شکل بیشینه نیروی اکستروژن حاصل از مدل و محاسبه شده را برحسب دمای اولیه شمش نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج نشان‌دهنده تطابق نتایج حاصل از مدل و محاسبه شده است، به‌گونه‌ای که حداکثر اختلاف بین نتایج ۵٪ است که این میزان خطا در نتایج مدل قابل قبول است.

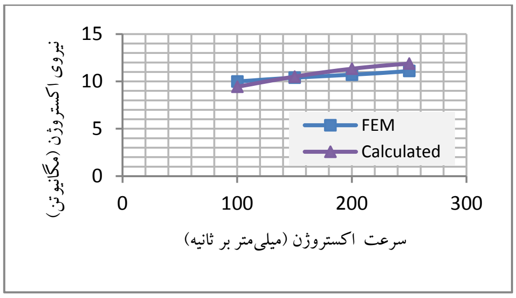
شکل (٦) منحنی نیروی اکستروژن برحسب مسافت طی شده توسط فک را در سرعت اکستروژن‌های مختلف نشان می‌دهد. در این شکل نیز مشابه شکل (٤)، نیروی اکستروژن در ابتدای فرایند با افزایش سریع، به مقدار بیشینه خود می‌رسد و پس از آن روند کاهشی آن شکل می‌گیرد.

منحنی‌های شکل (٦) به‌طور واضح اثر ناچیز سرعت اکستروژن را روی نیروی اکستروژن نمایش می‌دهند. در واقع طبق آنچه در این شکل مشخص است، با افزایش سرعت اکستروژن از ۱۰۰ به ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه، تنها یک مگانیوتن به نیروی اکستروژن افزوده شده است.

در شکل (۷) بیشینه نیروی اکستروژن بد ست آمده از شبیه سازی و روابط تحلیلی در سرعت‌های مختلف نشان داده شده است. طبق این شکل با افزایش سرعت اکســـتروژن، نیروی اکســـتروژن افزایش یافته که این افزایش ناچیز بوده و قابل صـــرفنظر اســـت. لذا می‌توان گفت افزایش سرعت اکستروژن اثر چندانی روی نیروی اکستروژن ندارد که این موضوع در کار یانگ و همکاران [26] نیز مشاهده شد، هرچند در این کار مشخص شد که کاهش بیش‌ازحد ســـرعت اکســـتروژن باعث کاهش دمای شـــمش درحین فرایند و لذا باعث افزایش نیروی اکستروژن می‌شود.



شکل ٦ منحنی نیروی اکستروژن برحسب مسافت طی‌شده توسط فک در سرعت اکستروژن‌های مختلف.



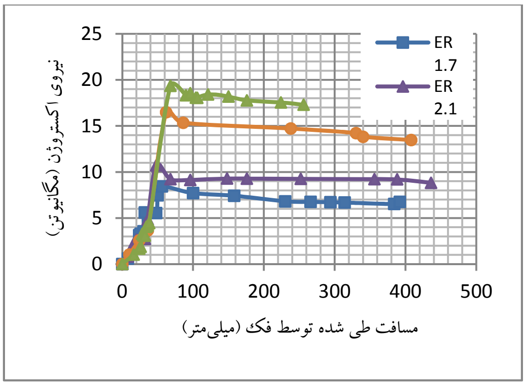
شکل ۷ بیشینه نیروی اکستروژن اجزای محدود و محاسبه شده برحسب سرعت اکستروژن

با مقایسه نتایج حاصل از مدل و نتایج محاسبه شده، حداکثر اختلاف بین نتایج حدود ٦٪ است که این میزان خطا در نتایج مدل قابل قبول است و لذا می‌توان صحت نتایج حاصل از مدل را تأیید کرد.

شکل (۸) منحنی نیروی اکستروژن برحسب مسافت فک را در نسبت اکستروژن‌های مختلف نشان می‌دهد. در این شکل نیز روند منحنی نیرو مشابه شکل‌های(٤ و ٦)

است.

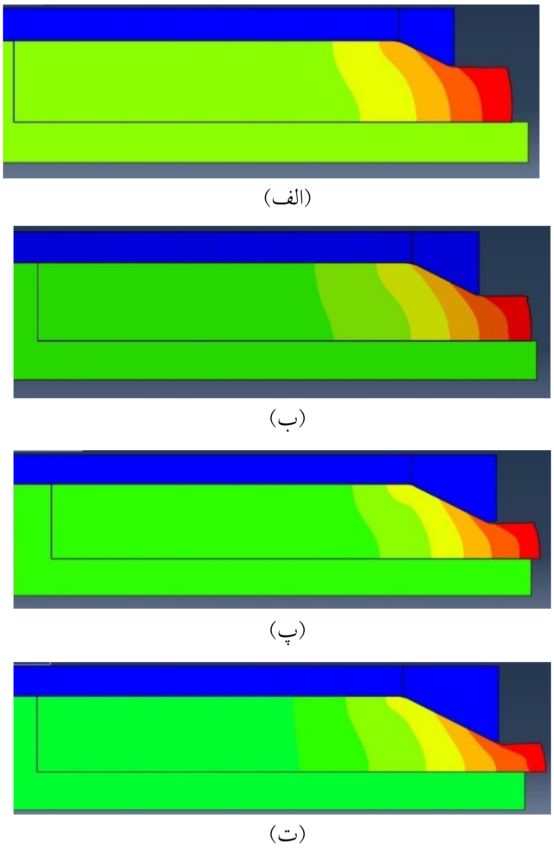
همان‌طور که در منحنی‌های شکل(۸) مشخص است، نسبت اکستروژن روی نیروی اکستروژن اثر قابل قبولی دارد. در واقع طبق آنچه در این شکل مشخص است، با افزایش نسبت اکستروژن از ۲/۱ به ۳/٦، نیروی اکستروژن از حدود ۱۱ مگانیوتن به حدود ۱۹ مگانیوتن می‌رسد. علت این افزایش را می‌توان در نحوه جریان یافتن ماده در نسبت اکستروژن‌های مختلف جست‌وجو کرد.



شکل (۸): منحنی نیروی اکستروژن برحسب مسافت طی‌شده توسط فک در نسبت اکستروژن‌های مختلف

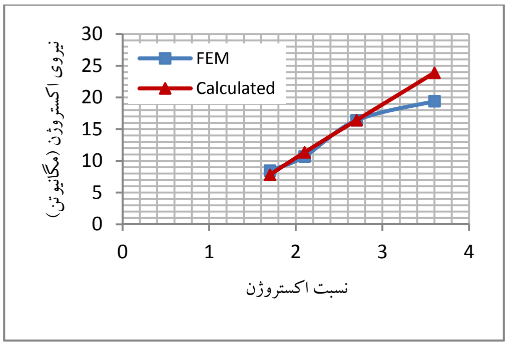
با افزایش نسبت اکستروژن، جریان ماده در کناره‌ها، که در تماس با سطح قالب و سنبه است، کند شده و در مرکز آن جریان ماده تندتر خواهد بود. این حالت جریان باعث آشفتگی حرکت ماده در خروج از قالب شده و مانع از رسیدن شمش به حالت پایدار می‌رسد. لذا برای گذر از این حالت و رسیدن به حالت پایدار (ناحیه ۲ در منحنی نیروی اکستروژن)، نیروی بیشتری به شمش وارد می‌شود. شکل(۹) جریان ماده را در زمان ۰/٤ ثانیه برای نسبت اکستروژن‌های مختلف نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شـــکل(۹) مشـــاهده می‌شـــود، با افزایش نسبت اکستروژن، تلاطم در جریان ماده بیشتر شده و ماده به‌صورتی خارج می‌شود که مرکز آن زودتر از کناره‌ها از قالب خارج می‌شـــود. در [23] نیز به این موضوع اشاره شده است.



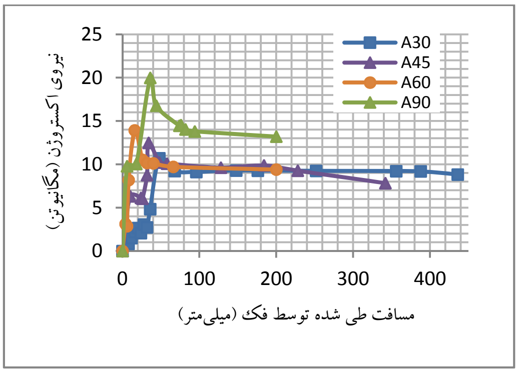
شکل ۹ جریان ماده (مسافت طی شده بخش‌های مختلف شمش) در نسبت اکستروژن‌های؛ (الف) ۱/۷، (ب) ۲/۱، (پ) ۲/۷، (ت) ۳/٦

در شکل(۱۰) بیشینه نیروی اکستروژن بدست آمده از شبیه‌سازی و روابط تحلیلی در نسبت‌های اکستروژن مختلف نشان داده شده است. طبق این شکل با افزایش نسبت اکستروژن، نیروی اکستروژن با افزایش قابل توجهی روبرو شده است. با توجه به شکل، می‌توان گفت با دو برابر شدن نسبت اکستروژن، نیروی اکستروژن نیز تقریبا به دوبرابر مقدار خود رسیده است. با این‌حال، نسبت اکستروژن بعد از دمای اولیه شمش، بیشترین اثر را روی نیروی اکستروژن دارد و طبق آنچه در کار هانسون و جانسون[12] نیز مشاهده شد، دمای اولیه شمش شدیدترین اثر را روی نیروی اکستروژن دارد.



شکل ۱۰ بیشینه نیروی اکستروژن حاصل از مدل و محاسبه شده برحسب نسبت اکستروژن

با مقایسه نتایج حاصل از مدل و نتایج محاسبه شده، حداکثر اختلاف بین نتایج حدود ۱۸٪ است که این میزان خطا را می‌توان ناشی از تولید حرارت در اثر اصطکاک قالب و شمش دانست که در محاسبات درنظر گرفته نشد. شکل(۱۱) منحنی نیروی اکستروژن برحسب مسافت فک را در زاویه قالب‌های مختلف نشان می‌دهد. در این شکل نیز تغییرات نیروی اکستروژن مشابه شکل‌های(٤ و٦ و۸) می‌باشد.



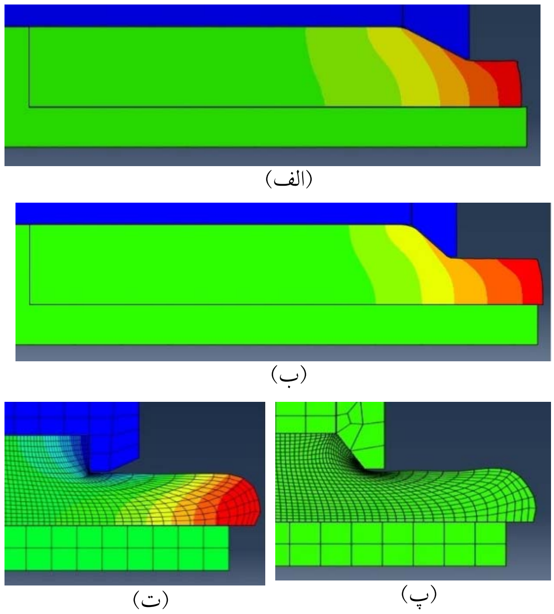
شکل ۱۱ منحنی نیروی اکستروژن برحسب مسافت طی‌شده توسط فک در زاویه قالب‌های مختلف؛ A30: ۳۰ درجه، A45: ٤٥ درجه، A60: ٦۰ درجه، A90: ۹۰ درجه

همانطور که در منحنی‌های شکل(۱۱) مشخص است، زاویه قالب روی نیروی اکستروژن اثرگذار هست. طبق آنچه در شکل مشخص است، افزایش زاویه قالب، باعث افزایش نیروی اکستروژن می‌شود و تغییر زاویه قالب از ۳۰ درجه به ٦۰ درجه موجب افزایش نیروی اکستروژن از حدود ۱۰ مگانیوتن به حدود ١٤ مگانیوتن می‌شود. همچنین با تغییر زاویه قالب به ۹۰ درجه و درواقع استفاده از قالب مسطح، نیروی اکستروژن به حدود ۲۰ مگانیوتن خواهد رسید. علت این افزایش را علاوه بر آنچه قبلا درمورد جریان ماده گفته شد، می‌توان به شکل‌گیری منطقه مرده در پشت قالب، با افزایش زاویه آن، مرتبط دانست.

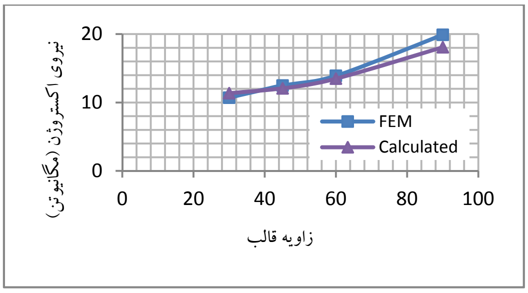
با افزایش زاویه قالب، به‌علت کاهش سیلان ماده، جریان ماده در کناره‌ها، که در تماس با سطح قالب و سنبه است، کند شده و در مرکز آن جریان ماده تندتر خواهد بود. این کندی جریان در کناره‌ها باعث می‌شود که برای عبور ماده از قالب، به نیروی بیشتری نیاز شود که نیروی اضافی صرف عبور ماده از پشت قالب می‌شود. شکل (۱۲) جریان ماده را در زمان ۰/٤ ثانیه برای زاویه قالب های مختلف نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه قالب، تلاطم در جریان ماده بیشتر شده و ماده به‌صورتی خارج می‌شود که مرکز آن زودتر از کناره‌ها از قالب خارج می‌شود. در [۲۳] و همچنین در کار سفوقلو و گدیکلی [3] نیز به این موضوع اشاره شده است. این تلاطم در جریان ماده به‌گونه‌ای است که با افزایش زاویه قالب و شکل‌گیری منطقه مرده در پشت قالب، در زاویه مشخصی، بین لایه‌های ماده در پشت قالب، برش ایجاد شده و ماده برای پرکردن فضای خالی ایجاد شده دراثر گیرافتادن ماده در پشت قالب، جریان می‌یابد که این جریان ماده در شکل‌های(۱۲–پ و ۱۲–ت) مشخص است. شکل(۱۳) بیشینه نیروی اکستروژن بدست آمده از شبیه‌سازی و روابط تحلیلی را در زاویه قالب‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل و نتایج حاصل از مدل، می‌توان گفت با تغییر زاویه قالب از ۳۰ درجه به ۹۰ درجه (تغییر نوع قالب از قالب مخروطی به قالب مسطح)، نیروی اکستروژن تقریبا دو برابر می‌شود. درواقع می‌توان گفت افزایش زاویه قالب و تغییر نوع قالب از مخروطی

به مسطح باعث افزایش نیروی اکستروژن می‌شود.



شکل ١٢ جریان ماده (مسافت طی شده بخش‌های مختلف شمش) در زاویه قالب‌های؛ (الف) ٣٠درجه، (ب) ٤٥ درجه، (پ) ٦٠ درجه، (ت) ٩٠ درجه

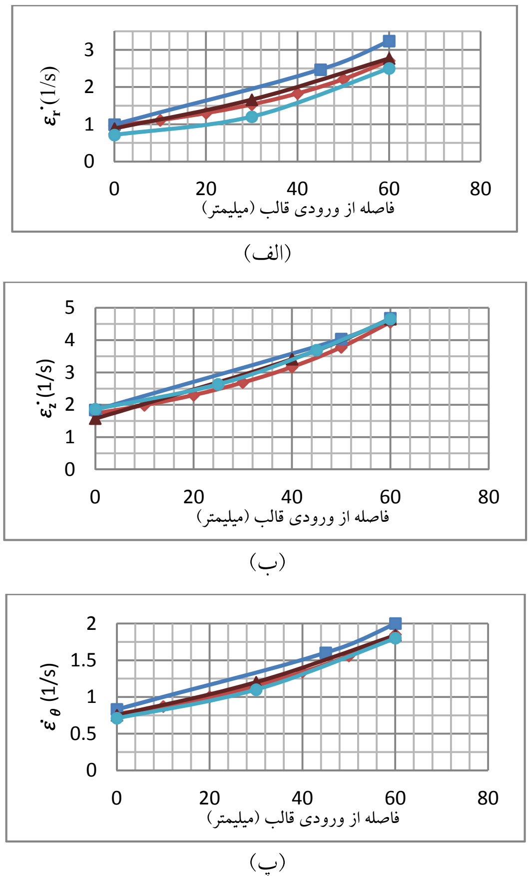


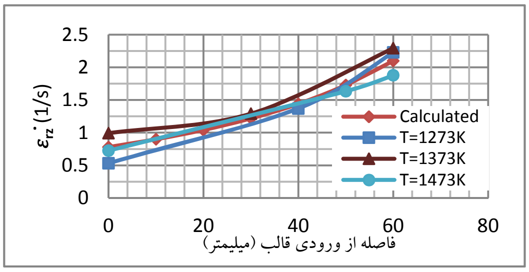
شکل ١٣ بیشینه نیروی اکستروژن حاصل از مدل و محاسبه شده برحسب زاویه قالب

با مقایسه نتایج حاصل از مدل و نتایج محاسبه شده، حداکثر اختلاف بین نتایج حدود ٪٩ است که علت این میزان خطا را نیز مشابه آنچه قبلا گفته شد، می‌توان ناشی از تولید حرارت در اثر اصطکاک قالب و شمش دانست که در محاسبات درنظر گرفته نشده است.

اثر پارامترهای اولیه روی نرخ کرنش و اجزای آن. از آنجایی که در شبیه سازی فرایند از مدل متقارن محوری دوبعدی استفاده شد، لذا نتایج بدست آمده نیز در مختصات استوانه‌ای می‌باشد. شکل (١٤) مؤلفه‌های نرخ کرنش حاصل از اجزای محدود و روابط محاسباتی (رابطه (٢) تا رابطه (٦)) را در منطقه تغییرشکل (دهانه ورودی قالب تا دهانه خروجی قالب) در دماهای اولیه شمش مختلف نشان می‌دهد. به‌جز نرخ کرنش در جهت اکستروژن، جهت سایر اجزای نرخ کرنش درخلاف جهت خود و به‌سمت خروجی قالب می‌باشد.

منحنی‌های موجود در شکل نشان می‌دهد که دمای اولیه شمش، نرخ کرنش را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. هرچند اختلاف ناچیزی بین منحنی نرخ‌کرنش در دماهای مختلف وجود دارد که قابل چشم‌پوشی است. همچنین بین نتایج حاصل از مدل و روابط برای نرخ‌کرنش جزئی، انطباق مشهود است. همچنین شکل (١٤) نشان می‌دهد که با نزدیک شدن به خروجی قالب، نرخ‌کرنش‌های جزئی افزایش می‌یابد. وجود نرخ کرنش درجهت θ (شکل ١٤-ج) بیانگر آن است که درحین تغییرشکل شمش و خروج آن از قالب، شمش دچار پیچش نیز می‌شود.





(ت)

شکل ۱٤ مؤلفه‌های نرخ کرنش محاسبه شده و حاصل از مدل در دماهای اولیه شمش مختلف؛ (الف) $\dot{\varepsilon}_r$، (ب) $\dot{\varepsilon}_z$، (ج) $\dot{\varepsilon}_\theta$، (د) $\dot{\varepsilon}_{rz}$

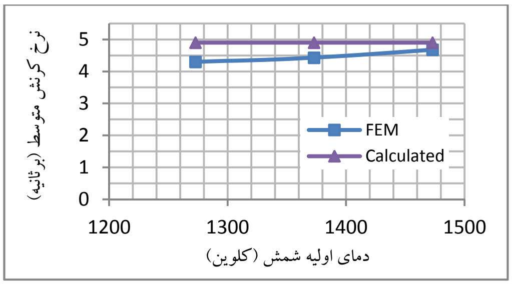
از آنجایی که بیشترین سرعت حرکت ماده در لحظه خروج از قالب است، اجزای نرخ کرنش نیز در خروجی قالب به مقدار بیشینه خود می‌رسند که این موضوع در شکل (١٤) به‌وضوح مشخص است.

در شکل (١٥) نرخ کرنش متوسط حاصل از مدل و محاسبه شده با استفاده از رابطه (٧)، در منطقه تغییرشکل، برحسب دمای اولیه شمش آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دما تغییر چندانی در نرخ‌کرنش متوسط در منطقه تغییرشکل ایجاد نمی‌شود. با این وجود، با توجه به روابط مربوط به مؤلفه‌های نرخ کرنش (رابطه (٢) تا رابطه (٦)) و همچنین رابطه (٧) که مربوط به نرخ کرنش متوسط است، مشاهده می‌شود که نرخ کرنش یک پارامتر هندسی بوده و مستقل از دما می‌باشد. لذا این افزایش ناچیز دراثر تغییر دما نبوده و به همراه اختلاف بین نتایج محاسبه شده و نتایج حاصل از مدل، می‌تواند به شرایط محاسباتی مدل برگردد.

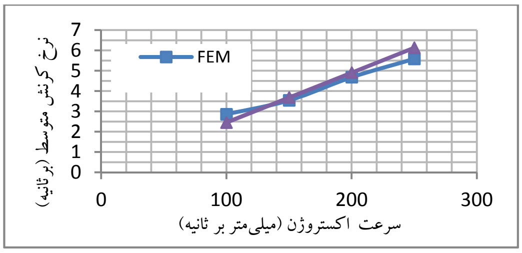
شکل (١٧) نرخ کرنش درجهت اکستروژن را برای نتایج حاصل از مدل اجزای محدود و نتایج بدست آمده از رابطه (٤) نشان می‌دهد. با افزایش زاویه قالب، نرخ‌کرنش افزایش یافته است. این افزایش را می‌توان با مقایسه مقدار نرخ‌کرنش در خروجی قالب مشاهده کرد، به‌طوری که در زاویه قالب ٣٠ درجه، نرخ‌کرنش در خروجی قالب، حدود ٤/٥ برثانیه و در زاویه قالب ٤٥ درجه، نرخ‌کرنش در خروجی قالب، حدود ١٠ برثانیه می‌باشد.

برای بیان بهتر و مشاهده واضح‌تر هندسی بودن نرخ-کرنش، نتایج مربوط به نرخ کرنش متوسط که از مدل اجزای محدود و روابط تحلیلی بدست آمده است، در شکل (١٦) برای تغییر سرعت اکستروژن، نسبت اکستروژن و زاویه قالب، آورده شده است.

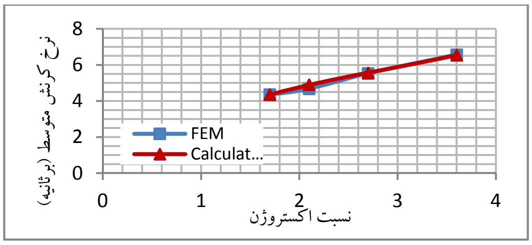
همانطور که در شکل (١٦) مشاهده می‌شود، سرعت اکستروژن و نسبت اکستروژن روی نرخ کرنش متوسط اثر مستقیم دارد ولی نرخ کرنش متوسط مستقل از زاویه قالب است که این موضوع در رابطه (٧) نیز به‌وضوح مشخص است. با این حال، با توجه به شکل (١٧) و روابط (٢) تا (٦)، زاویه قالب روی مؤلفه‌های نرخ کرنش مؤثر است.



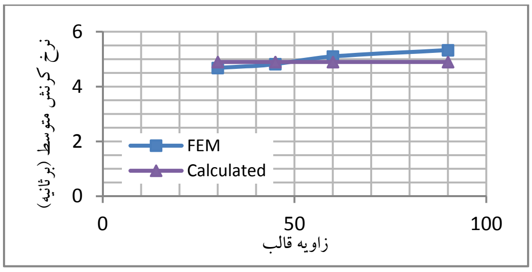
شکل ١٥ نرخ کرنش متوسط اجزای محدود و محاسبه شده برحسب دمای اولیه شمش



(الف)

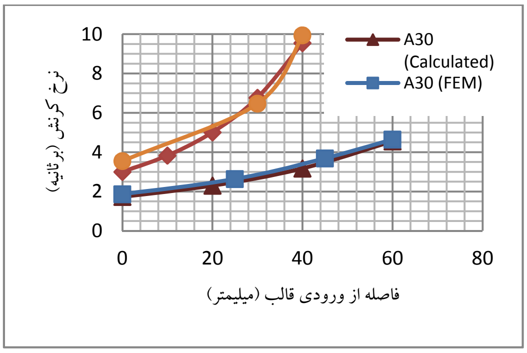


(ب)



(پ)

شکل ۱٦ نرخ کرنش متوسط محاسبه شده و حاصل از مدل اجزای محدود برحسب (الف) سرعت اکستروژن، (ب) نسبت اکستروژن، (ج) زاویه قالب



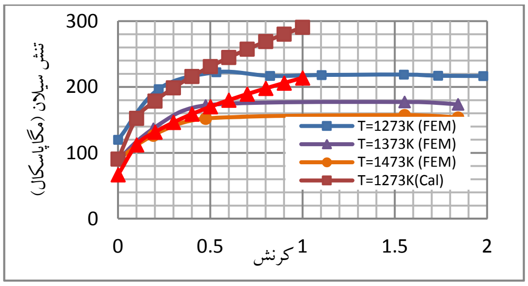
شکل ۱۷ نرخ‌کرنش محاسبه شده و حاصل از مدل در جهت اکستروژن ($\dot{\varepsilon}_z$) در زاویه قالب‌های مختلف؛ A30: ۳۰ درجه، A45: ٤٥ درجه

طبق آنچه در شکل‌های(۱٦ و ۱۷) مشاهده می‌شود، نتایج حاصل از مدل اجزای محدود و نتایج حاصل از روابط تحلیلی، انطباق خوبی را نشان می‌دهد و حداکثر اختلاف بین نتایج حدود ۸٪ بوده که قابل قبول می‌باشد.

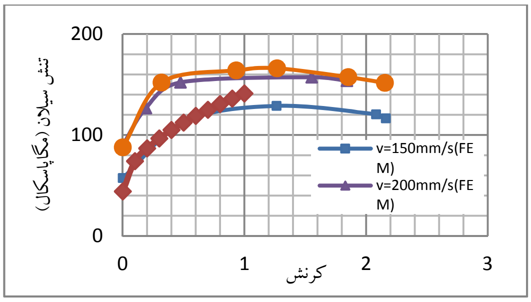
اثر پارامترهای اولیه روی تنش سیلان. شکل (۱۸) منحنی‌های تنش سیلان برحسب کرنش پلاستیک حاصل از مدل اجزای محدود و رابطه (۱۲) را در دماهای اولیه شمش مختلف، سرعت اکستروژن‌های مختلف، نسبت اکستروژن‌های مختلف و زاویه قالب‌های مختلف نشان می‌دهد. همانطور که در منحنی‌های مربوط به مدل اجزای محدود مشاهده می‌شود، تنش سیلان ابتدا افزایش یافته و سپس به حالت تقریبا ثابتی می‌رسد. همچنین مقدار تنش سیلان با افزایش دما، کاهش یافته و با افزایش سرعت اکستروژن و نسبت اکستروژن، افزایش یافته است. با این حال منحنی‌های مربوط به رابطه (۱۲) سیر صعودی را در تنش سیلان نشان می‌دهد.

روند صعودی موجود در منحنی‌های مربوط به رابطه (۱۲) به این علت است که در محاسبات انجام شده، افزایش دما در حین فرایند، در رابطه درنظر گرفته نشد. در واقع با ثابت فرض کردن دما در محاسبات، با افزایش کرنش، تنش سیلان ماده نیز افزایش می‌یابد.

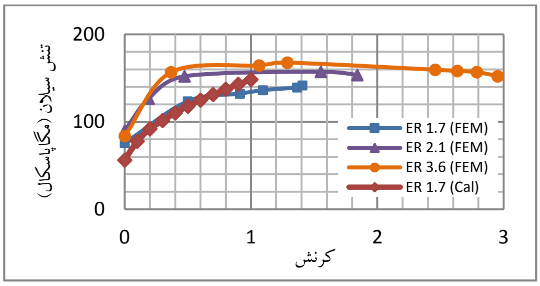
این درحالی است که در شرایط واقعی، کار مکانیکی باعث افزایش دما می‌شود و در اکستروژن نیز با توجه به اینکه تغییرشکل شدید انجام می‌شود، حرارت تولید می‌شود. به‌گونه‌ای که این تولید حرارت که حدود ۹۸٪ کار انجام شده را شامل می‌شود، علاوه بر اینکه با افت دما در قطعه به‌علت انتقال حرارت بین شمش و تجهیزات فرایند مقابله می‌کند، بلکه باعث افزایش دمای قطعه نیز می‌شود. این افزایش دما باعث کاهش مقاومت ماده در برابر تغییرشکل و درپی آن کاهش تنش سیلان ماده می‌شود. شکل(۱۹) بیشینه افزایش دما را در دو حالت نتایج حاصل از مدل اجزای محدود و نتایج حاصل از محاسبه رابطه (۱۳)، در دماهای اولیه مختلف، سرعت اکستروژن‌های مختلف و نسبت اکستروژن‌های مختلف نشان می‌دهد.



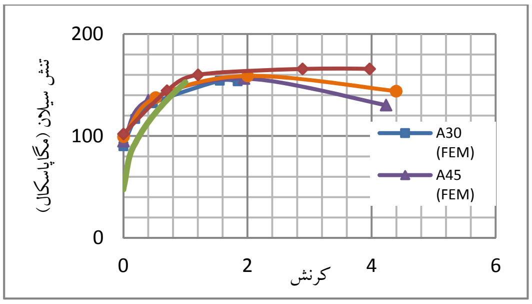
(الف)



(ب)



(پ)



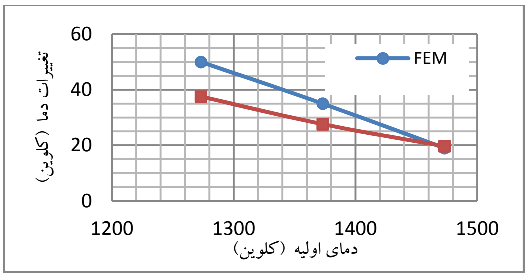
(ت)

شکل ۱۸ منحنی‌های تنش سیلان – کرنش پلاستیک حاصل از مدل اجزای محدود و رابطه تحلیلی در (الف) دماهای اولیه شمش مختلف، (ب) سرعت اکستروژن‌های مختلف، (ج) نسبت اکستروژن‌های مختلف، (د) زاویه قالب‌های مختلف

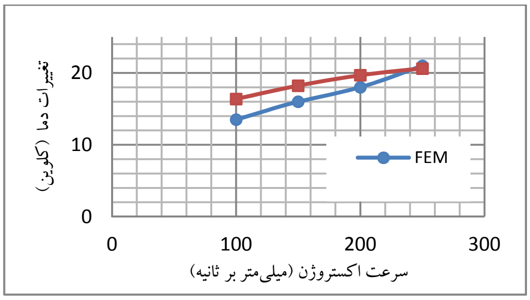
همان‌طور که در شکل(۱۹ الف و ب) مشاهده می‌شود، با کاهش دمای اولیه شمش، یا افزایش سرعت اکستروژن و یا افزایش نسبت اکستروژن، میزان افزایش در دمای شمش درحین عملیات اکستروژن بیشتر می‌شود. روند تغییرات دما وابسته به دمای اولیه شمش و سرعت اکستروژن، در کار یانگ و همکارانش[26] که روی آلیاژ مقاوم به خوردگی ۸۲۵ آلیاژی انجام شده نیز مشابه آن چیزی است که از این کار بدست آمده است.

روند مورد بحث، در دو حالت محاسبه شده و نتایج حاصل از مدل اجزای محدود به‌وضوح مشخص است. علت این موضوع به رابطه تنش سیلان ماده با دما و رابطه دما با کار تغییرشکل برمی‌گردد. در واقع با کاهش دمای اولیه شمش، تنش سیلان ماده افزایش یافته و با افزایش تنش سیلان ماده، مقاومت آن در برابر کار تغییرشکل بیشتر می‌شود و لذا میزان کار انجام شده برای انجام تغییرشکل موردنظر بیشتر می‌شود. همچنین افزایش سرعت فرایند باعث افزایش کار موردنیاز برای تغییرشکل می‌شود. لذا از آنجایی که کاهش دمای اولیه و افزایش سرعت اکستروژن، باعث افزایش کار موردنیاز تغییرشکل می‌شود، باتوجه به تبدیل ۹۸٪ کار تغییرشکل به حرارت، افزایش دمای بیشتری اتفاق می‌افتد.

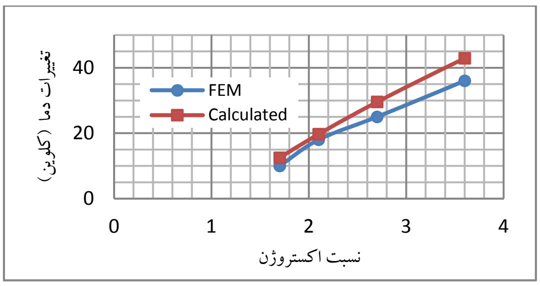
همانطور که در شکل(۱۹) مشاهده می‌شود، حداکثر اختلاف بین نتایج حاصل از مدل اجزای محدود و نتایج حاصل از رابطه (۱۳) حدود ۱۵٪ است که از دلایل آن می‌توان به صرفنظر کردن از محاسبه حرارت تولیدی در اثر اصطکاک بین قالب و شمش به علت کم بودن مقدار آن دانست.



(الف)



(ب)



(پ)

شکل ۱۹ بیشینه افزایش دما حاصل از مدل اجزای محدود و رابطه (۱۳) در (الف) دماهای اولیه شمش مختلف، (ب) سرعت اکستروژن‌های مختلف، (ج) نسبت اکستروژن‌های مختلف

نتیجه‌گیری

- دمای اولیه شمشال بیشترین اثر را روی نیروی اکستروژن داد، به‌طوری که با افزایش دمای اولیه از ۱۲۷۳ به ۱٤۷۳ کلوین، نیروی اکستروژن نصف شده و از حدود ۲۰ مگانیوتن به حدود ۱۰ مگانیوتن رسید. به‌عبارتی دیگر با افزایش ۱٦٪ دمای اولیه، نیرو حدود ۵۰٪ کاهش یافت.
- سرعت اکستروژن، اثر ناچیزی روی نیروی اکستروژن دارد، به‌طوری که با افزایش سرعت اکستروژن از ۱۰۰ به ۲۰۰ میلی‌متر برثانیه، حدود یک مگانیوتن به نیروی اکستروژن اضافه می‌شود. به‌عبارتی دیگر با دو برابر شدن سرعت اکستروژن، حدود ۸٪ افزایش در نیروی اکستروژن ایجاد شد.
- نسبت اکستروژن نیز مانند دمای اولیه شمش، اثر قابل توجهی روی نیروی اکستروژن دارد، که بیشترین علت آن تغییر سیلان ماده با تغییر نسبت اکستروژن و در واقع با افزایش نسبت اکستروژن، جریان آشفته‌تر شده که موجب افزایش نیروی موردنیاز برای جریان یافتن ماده از دهانه قالب می‌شود.
- زاویه قالب تأثیر چندانی روی نیروی اکستروژن ندارد و به بیانی دیگر نسبت به سایر متغیرها تأثیر آن ناچیز است. به‌طوری که با افزایش زاویه قالب از ۳۰ درجه به ٦۰ درجه حدود سه مگانیوتن به نیروی اکستروژن افزوده می‌شود. با این حال نوع قالب اثر قابل قبولی روی نیروی اکستروژن دارد، به‌طوری که انجام فرایند با قالب مخروطی زاویه ۳۰ درجه، حدود نیمی از نیروی موردنیاز فرایند با قالب مسطح را نیاز دارد.
- پارامترهای بهینه بدست آمده برای انجام فرایند اکستروژن لوله فولاد زنگ‌نزن ۳۰٤، استفاده از دما اولیه شمشال حدود ۱٤۷۳ کلوین، سرعت اکستروژن بین ۱۵۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر برثانیه، نسبت اکستروژن کمتر از ۲/۷ و ترجیحا ۲/۱ و کمتر از آن و زاویه قالب کمتر از ٤۵ درجه و ترجیحا ۳۰ درجه و پایین-تر برای عدم شکل‌گیری منطقه مرده و یا کاهش محدوده این منطقه، می‌باشد که شرایط انجام فرایند با کمترین نیروی اکستروژن را فراهم می‌کند.

مراجع

1. Li L., Zhang H., Zhou J., Duszczyk J., Li G.Y., Zhong Z.H., "Numerical and Experimental Study on the Extrusion through a Porthole Die to Produce a Hollow Magnesium Profile with Longitudinal Weld Seams", *Materials and Design*, Vol. 29, pp. 1190-11098, (2008).
2. Guo L.G., Dong K.K., Zhang B.J., Yang H., Zheng W.D., Liu X.W., “Dynamic Recrystallization Rules in Needle Piercing Extrusion for AISI304 Stainless Steel Pipe”, *Transaction of Nonferrus Metals Society of China*, Vol. 22, pp. 519-527, (2012).
3. Sofuoglu H., Gedikli H., “Physical and Numerical Analysis of Three Dimensional Extrusion Process”, *Computational Materials Science*, Vol. 31, pp. 113-124, (2004).
4. Kobayashi S., Oh S., Altan T., “Metal Forming and the Finite-Element Method”, Oxford University Press, (1989).
5. Fietier N., Krahenbuhl Y., Vialard M., “New methods for the fast simulations of the extrusion process of hot metals”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 2244-2259, (2009).
6. Hansson S., Jansson T., “Sensitivity Analysis of a Finite Element Model for the Simulation of Stainless

Steel Tube Extrusion", *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 210, pp. 1386-1396, (2010).

7. Damodaran D., Shivpuri R., "Prediction and Control of Part Distortion during the Hot Extrusion of Titanium Alloys", *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 150, pp. 70-75, (2004).

8. Li L.X., Rao K.P., Lou Y., Peng D.S., "A Study on Hot Extrusion of Ti-6Al-4V Using Simulations and Experiments", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 44, pp. 2415-2425, (2002).

9. Hansson S., "Modeling of the Stainless Steel Tube Extrusion Process", DOC, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Lulea University of technology, (2009).

10. Epler M.E., Misiolek W.Z., "Novel Billet Design for Co-extrusion of Ferrous Material Tubes", *Materials Science and Engineering*, Vol. 429, pp. 43-50, (2006).

11. Sivaprasad P.V., Venugopal S., Davies C.H.J., Prasad Y.V., "Indentification of Optimum Process Parameters for Hot Extrusion Using Finite Element Simulation and Processing and Processing Maps", *Modelling and Simulation in Materials Science*, Vol. 12, pp. 285-291, (2004).

12. Czarkowski P., Krawczynska A.T., Slesinski R., Brynk T., Budniak J., Lewandowska M., Kurzydlowski K.J., "Low Temperature Mechanical Properties of 316L Type Stainless Steel after Hydrostatic Extrusion", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 86, pp. 2517-2521, (2011).

13. Alfaro I., Bel D., Cueto E., Doblare M., Chinesta F., "Three-dimensional simulation of aluminium extrusion by the α-shape based natural element method", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 195, pp. 4269-4286, (2006).

14. Hansson S., Fisk M., "Simulations and Measurements of Combined Induction Heating and Extrusion Processes", *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 46, pp. 905-915, (2010).

15. Gouveria B.P.P.A., Rodrigues J.M.C., Martins P.A.F., Bay N., "Physical Modeling and Numerical Simulation of the round-to-square Forward Extrusion", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 112, pp. 244-251, (2001).

16. Paine A., Aloe M., Walters J., "Simulation of Hot Extrusion Processes", *Aluminum Extrusion*, Vol. 7, pp. 39-44, (2002).

17. Lenard J.G., Pietrzyk M., Cser L., "Mathematical and physical simulation of the properties of hot rolled", Elsevier, Tokyo, (1999).

18. Hansson S., "Modeling of the Stainless Steel Tube Extrusion Process", DOC, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Lulea University of technology, (2009).

19. Haghighat H., Moradmand M., "Upper Bound Analysis of Thick Wall Tubes Extrusion Process Through Rotating Curved Dies", *Mechanica*, Vol. 48, pp. 1947-1958, (2013).

20. Chang K.T., Choi J.C., "Upper-Bound Solutions to Tube Extrusion Problems Through Curved Dies", *Journal of Engineering for Industry*, pp. 1108-1111, (1972).

21. Park S.S., You B.S., Yoon D.J., Effect of the Extrusion Conditions on the Texture and Mechanical

Properties of Indirect-Extruded Mg–3Al–1Zn Alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 5940-5943, (2009).

22. Ebrahimi R., Reihanian M., Kanaani M., Moshksar M.M., "An Upper-Bound Analysis of the Tube Extrusion Process", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 199, pp. 214-220, (2008).
23. Hoffmanner A.L., "Metal Forming Interrelation between Theory and Practice", Plenum Press, New York, (1971).
24. Bosetti P., Maximiliano C., Bort G., Bruschi S., "Identification of Johnson–Cook and Tresca's Parameters for Numerical Modeling of AISI-304 Machining Processes", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 135, pp. 1-8, (2013).
25. Li L., Zhou J., Duszczyk J., "Determination of a Constitutive Relationship for AZ31B Magnesium Alloy and Validation Through Comparison between Simulated and Real Extrusion", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, pp. 372-380, (2006).
26. Yang L., Geng Z., Zhang M., Dong J., "Study on Hot Deformation Behavior and Numerical Simulation for Hot Extrusion Process of Corrosion Resistant 825 Alloy", *Procedia Engineering*, Vol. 27, pp. 997-1007, (2012).
27. Roberts G., Krauss G., Kennedy R., "Tool Steels", 5th Edition, ASM International, USA, (1998).